

PAT-NO: JP410206513A

DOCUMENT-IDENTIFIER: JP 10206513 A

TITLE: FERROMAGNETIC SPIN TUNNEL EFFECT ELEMENT

PUBN-DATE: August 7, 1998

INVENTOR-INFORMATION:

NAME

SUZUKI, MOTOFUMI  
OWAKI, TAKESHI  
TAGA, YASUNORI  
TADANO, HIROSHI  
KACHI, TORU  
TANAKA, YUICHI  
TOMITA, KAZUYOSHI

ASSIGNEE-INFORMATION:

NAME	COUNTRY
TOYOTA CENTRAL RES & DEV LAB INC	N/A

APPL-NO: JP09023256

APPL-DATE: January 21, 1997

INT-CL (IPC): G01R033/06, G11B005/39, H01F010/08, H01L043/08

ABSTRACT:

PROBLEM TO BE SOLVED: To improve the element stability of a ferromagnetic spin tunnel effect element.

SOLUTION: The first ferromagnetic film 12 and the second ferromagnetic film 14 are opposed to each other via an insulating layer 13, and a dilute magnetic semiconductor layer 22 is formed on the second ferromagnetic film 14 via a ferromagnetic insulating layer 21. By controlling the direction of the spin of electrons injected into the dilute magnetic semiconductor layer 22, it is possible to magnetize only the second ferromagnetic film 14 in an intended direction. By this, the controllability of magnetism detection is improved to widen applications to a storage device and current modulating element.

COPYRIGHT: (C)1998,JPO

(19)日本国特許庁 (JP)

(12) 公開特許公報 (A)

(11)特許出願公開番号

特開平10-206513

(43)公開日 平成10年(1998)8月7日

(51)Int.Cl.\*

識別記号

F I

G 01 R 33/06

G 01 R 33/06

Z

G 11 B 5/39

G 11 B 5/39

H 01 F 10/08

H 01 F 10/08

H 01 L 43/08

H 01 L 43/08

Z

審査請求 未請求 請求項の数1 FD (全 8 頁)

(21)出願番号 特願平9-23256

(71)出願人 000003609

株式会社豊田中央研究所

愛知県愛知郡長久手町大字長湫字横道41番  
地の1

(72)発明者 鈴木 基史

愛知県愛知郡長久手町大字長湫字横道41番  
地の1 株式会社豊田中央研究所内

(72)発明者 大脇 健史

愛知県愛知郡長久手町大字長湫字横道41番  
地の1 株式会社豊田中央研究所内

(74)代理人 弁理士 藤谷 修

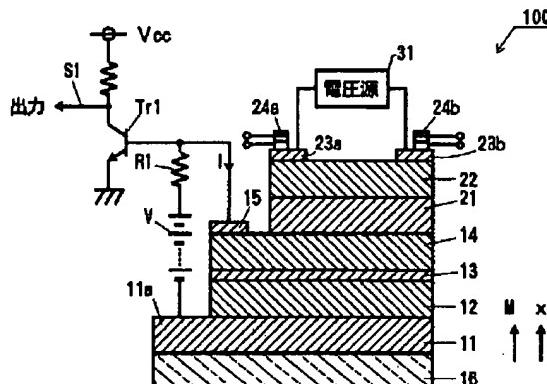
最終頁に続く

(54)【発明の名称】 強磁性スピントンネル効果素子

(57)【要約】

【課題】強磁性スピントンネル効果素子の素子安定性を向上させること。

【解決手段】第1強磁性薄膜12と第2強磁性薄膜14とを絶縁層13を介して対向させ、第2強磁性薄膜14の上に強磁性絶縁層21を介して希薄磁性半導体層22を形成した。この希薄磁性半導体層22へ注入される電子のスピンの方向を制御することで、第2強磁性薄膜14だけを意図した方向に磁化させることができる。これにより磁場検出の制御性が向上し、記憶装置、電流変調素子への応用が拡大される。



1

## 【特許請求の範囲】

【請求項1】第1強磁性体と第2強磁性体とを絶縁層を介して対向させ、前記第1強磁性体と前記第2強磁性体との間の磁化方向の関係によって前記絶縁層を介して流れるトンネル電流が変化する強磁性スピントンネル効果を用いた素子において、前記第1強磁性体と前記第2強磁性体の少なくとも一方の上面に強磁性絶縁体を介して、前記強磁性絶縁体が直接、接合する前記第1強磁性体又は前記第2強磁性体の磁化方向を制御する磁化方向制御層を設けたことを特徴とする強磁性スピントンネル効果素子。

## 【発明の詳細な説明】

## 【0001】

【産業上の利用分野】本発明は、所定値以上の外部磁場の有無、又は、外部磁場の向きに応じて、流れる電流を2値レベルに切り換える素子に関する。さらに詳しくは強磁性スピントンネル効果を用いた素子に関し、磁気センサ、パルス式の回転又は位置センサ、磁気メモリ、磁気メモリに対する磁気ヘッド、電流変調素子、光一電流変調素子等に用いることができる。

## 【0002】

【従来の技術】従来、2つの強磁性体を極めて薄い絶縁体で挟んだ構造の強磁性スピントンネル効果素子が知られている(特開平6-244477号、特開平8-70148号、特開平4-103014号公報)。その素子は、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 等の絶縁体を介してFe、Co、Ni等の2つの強磁性体間に流れるトンネル電流の大きさが、2つの強磁性体の磁化の向きに依存して変化するというものである。即ち、2つの強磁性体の磁化の向きが同一方向(以下、単に、「平行」という)の場合には比較的大きな電流が流れ、磁化の向きが平行であるが向きが反対(以下、単に、「反平行」という)である場合には比較的小さな電流が流れる。このことは、2つの強磁性体間の抵抗値が2つの強磁性体の磁化の向きに応じて変化するとも言える。

## 【0003】

【発明が解決しようとする課題】上記の素子を磁場の検出素子として用いる場合は、一方の強磁性体の磁化の向きが外部磁場によって反転しない構造として、他方の強磁性体のみの磁化の向きを外部磁場に応じて反転可能な構造としていた。このために、通常は、一方の強磁性体の保持力を他の強磁性体の保持力よりも大きくし、検出すべき外部磁場が大きい保持力よりも小さくなる範囲で使用することで、外部磁場の向きに応じて2つの強磁性体の磁化の向きを平行と反平行とで切り換えることとした。

【0004】或いは、2つの強磁性体の保持力を代え、外部磁場が増大する時に、保持力の小さな強磁性体の磁化が先に外部磁場の向きに向くことを利用して、磁化状態が平行、反平行、平行と切り換わることで外部磁場の

2

変化を動的に検出していた。

【0005】このように、従来の素子では、外部磁場だけで平行と反平行状態を得るために、外部磁場を検出する時の使用方法が制限され、磁場検出の制御性に問題があった。よって、本発明の目的は、一方の強磁性体の磁化の向きを、外部磁場の向きに関係なく意図的に制御可能とすることで、磁場検出の制御性を改善すると共に、この素子の応用分野をメモリ、変調素子等へ拡大可能とすることである。

## 【0006】

【課題を解決するための手段】上記の課題を解決するために、本発明は、第1強磁性体と第2強磁性体とを絶縁層を介して対向させ、第1強磁性体と第2強磁性体との間の磁化方向の関係によって絶縁層を介して流れるトンネル電流が変化する強磁性スピントンネル効果を用いた素子において、第1強磁性体と第2強磁性体の少なくとも一方の上面に強磁性絶縁体を介して、強磁性絶縁体が直接、接合する第1強磁性体又は第2強磁性体の磁化方向を制御する磁化方向制御層を設けるという手段を採用了。

【0007】この磁化方向制御層としては、交換相互作用により偏極スピノン電子により磁化の向きが変化する希薄磁性半導体(DMS)を用いることができる。希薄磁性半導体は、磁気遷移金属イオンと伝導電子との磁気モーメントの交換相互作用が大きい材料であり、2B族元素と6B族元素より構成される化合物半導体、例えばCdTe、ZnSe等において、2B族元素の一部を遷移金属(Cr, Mn, Fe, Co, Ni等)に置き換えることにより得られる半導体が知られている。具体的には、 $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ 、 $\text{Zn}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Se}$ 、 $\text{Zn}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ 等が知られている。

【0008】又、Ni-Feーシアン錯体を用いても、偏極スピノン電子により磁化の向きを制御することができる。偏極スピノン電子を磁化方向制御層に注入する構成としては、磁化方向制御層にコイル等により磁化の向きが制御可能な強磁性体電極を用いることで、その磁化方向に向いたスピノン電子をより多く磁化方向制御層に注入することができる。この電極に偏極率の大きな磁性半金属を用いれば、磁化方向制御層をより効果的に所定方向に磁化させることができる。電極の代わりに、強磁性体又は磁性半金属で形成され、磁化方向が制御可能な細い針を真空のギャップを介して磁化方向制御層に対向させ、電界放出により偏極スピノン電子を磁化方向制御層に注入するようにしても良い。

【0009】又、希薄磁性半導体を用いた場合には、円偏光の回転方向により磁化方向が変化するので、偏極スピノン電子の注入に代えて、円偏光をDMSに照射しても良い。又、強磁性又はフェリ磁性絶縁体は磁化方向制御層の磁場を交換相互作用により第2強磁性体に伝達せるものであり、例えば、鉄ガーネット、 $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_12$ 、

$Y_{3-x}Bi_xFe_5O_{12}$ 等を用いることができる。又、強磁性体の表面のみを酸化処理して酸化膜を形成し、第1又は第2強磁性体と磁化方向制御層とを電気的に絶縁しても良い。

## 【0010】

【作用及び発明の効果】磁化方向制御層に偏極スピニン電子を注入することで、磁化方向制御層は所定方向に磁化される。尚、偏極スピニン電子はアップスピニンとダウンスピニンとで一方のスピニンの数が多い状態の電子をいう。この偏極スピニン電子により所定方向に磁化された磁化方向制御層は強磁性絶縁体を介して交換相互作用により、強磁性絶縁体が直接、接合する第1強磁性体又は第2強磁性体を所定方向に磁化させる。このようにして、第1強磁性体又は／及び第2強磁性体の磁化方向を磁化方向制御層に注入される偏極スピニン電子のスピニンの向きにより制御することが可能となる。このように、意図的に磁化方向が制御された強磁性体と外部磁場等によって磁化方向が変化する他の強磁性体とにおいて、磁化の平行、反平行状態の2状態が形成可能となり、第2強磁性体と第1強磁性体との間に流れるトンネル電流を検出することで、外部磁場の向きを容易に検出することができる。

【0011】又、希薄磁性半導体を用いた場合には、所定回転方向の円偏光をDMSに照射することにより、DMSを所定方向に磁化させることができる。このようにして、磁化方向制御層により意図的に磁化方向が制御できるために、外部磁場の検出、メモリの情報の書き込みや読み込みの制御が簡単となる。又、光-電気変調が可能となる。

## 【0012】

【発明の実施の形態】以下、本発明を具体的な実施例に基づいて説明する。図1は、本発明の具体的な第1の実施例に係る強磁性スピントンネル効果素子100の構造を示した断面図である。図1に示すように、ガラス基板16の上に、銅(Cu)から成る厚さ100nmの電極11が形成されており、その電極11の上に、Fe-1.7at%Ru合金から成る厚さ100nmの第1強磁性薄膜(第1強磁性体)12が形成されている。その第1強磁性薄膜12の上面には、厚さ10nmの低分子量の有機分子材料であるCuフタロシアニンから成る絶縁層13が形成されており、その絶縁層13の上面には、Fe-2.0at%C合金から成る厚さ100nmの第2強磁性薄膜(第2強磁性体)14が形成されている。さらに、第2強磁性薄膜14の上面には $Y_3Fe_5O_{12}$ で形成された厚さ10nmのフェリ磁性絶縁層(強磁性絶縁体)21が接合されており、その強磁性絶縁層21の上面にCd<sub>1-x</sub>Mn<sub>x</sub>Teから成る磁化方向制御層である希薄磁性半導体層(以下、「DMS層」という)22が接合されている。又、DMS層22上には、Fe-1.7at%Ru合金から成る注入電極23a、23bが形成されている。そして、注入電極23a、23bの上に

は、図2に示すように、フェライトコアを有するコイル24a、24bが配設されている。

【0013】次に、この強磁性トンネル効果素子100の製造方法について、図1に基づいて説明する。この素子100はイオンビーム・スパッタリング法により各層を順に蒸着することにより製造された。なお、スパッタリングに際にイオンガスとしてはArを用いた。尚、スパッタリング装置内のイオンガスの圧力を $2.5 \times 10^{-2}$ Pa、イオンガン加速電圧を1200V、イオン電流を120mA、ターゲット基板間距離を127mmとした。

【0014】最初に、基板10を室温に保ち、基板16の上に銅(Cu)をスパッタリングして厚さ100nmの電極11を形成し、この電極11の上面にFe-1.7at%Ru合金をスパッタリングして厚さ100nmの第1強磁性薄膜12を形成した。次に、この第1強磁性薄膜12の上面に低分子量の有機分子材料であるCuフタロシアニンを抵抗加熱蒸着して10nmの絶縁層13を形成し、この絶縁層13の上面にFe-2.0at%C合金をスパッタリングして厚さ100nmの第2強磁性薄膜14を形成した。さらに、この第2強磁性薄膜14の上面に $Y_3Fe_5O_{12}$ をスパッタリングして厚さ10nmのフェリ磁性絶縁層21を形成し、その上面にスパッタリングによりCd<sub>1-x</sub>Mn<sub>x</sub>Teから成るDMS層22を100nm形成した。

【0015】次に、ドライエッチングによりDMS層22と強磁性絶縁層21の一部をエッチングすることにより第2強磁性薄膜14の一部14aを露出させ、さらに、ドライエッチングにより第2強磁性薄膜14、絶縁層13、第1強磁性薄膜12の一部をエッチングすることにより電極11の一部11aを露出させた。そして、第2強磁性薄膜14の露出面14a上に銅を蒸着して電極15を形成した。次に、DMS層22の一部にFe-1.7at%Ru合金をスパッタリングして注入電極23a、23bを形成し、図2に示すように、その上にコイル24a、24bを配設した。

【0016】このように形成された素子100において、コイル24a、24bに直流電流を流すことで、注入電極23a、23bを上下方向(x軸方向)に磁化させることができる。この磁化した状態で、注入電極23bが正電位、注入電極23aが負電位となるように電源31を接続すれば、注入電極23aからその磁化の向きを向いたスピニンを有する電子を多数電子、逆向きのスピニンを有した電子を少數電子としてDMS層22に注入することができる。そして、この注入された多数電子のスピニンの向きに応じてDMS層22は上下方向に磁化される。

【0017】このDMS層22の磁場は、交換相互作用により、強磁性絶縁層21を介して第2強磁性薄膜14を磁化させる。この状態で、電極15と電極11間に電

圧Vを印加して、第2強磁性薄膜14と第1強磁性薄膜12との磁化の向きの関係が平行、反平行と変化することで、流れる電流Iの大きさを変化させることができ。このトンネル電流Iの変化は、抵抗R1の電圧降下に変換して検出され、トランジスタTr1をトンネル電流Iの大きさに応じてオンオフさせることで、トランジスタTr1のコレクタ電圧により出力信号S1として、外部に出力することができる。

【0018】次に、上記の強磁性スピントンネル効果素子100の動作原理について説明する。

a) 磁化の向きが平行の場合。

第1強磁性薄膜12と第2強磁性薄膜14とが同一方向に磁化された場合について説明する。図3(a)は、縦軸が電子のエネルギーを示し、横軸が電子エネルギーEにおける電子の状態密度D(E)を表している。良く知られたように、ある状態における電子の占有確率はエネルギーEに関してフェルミ・ディラックの分布関数F(E)に従って変化する。従って、エネルギーEにおける電子密度N(E)は、 $D(E) \cdot F(E)$ で与えられる。

【0019】又、良く知られたように、任意の温度で、電子の占有確率が1/2であるエネルギーEはフェルミレベルfeと言われ、物質中の電子の伝導挙動は、このフェルミレベルfeに対して微小幅△内に存在する電子の挙動により概ね決定される。

【0020】次に、第1強磁性薄膜12が図1に示す基準軸xの正の向きに磁化されたとする。強磁性体の伝導帯は交換相互作用によりアップスピンとダウンド спинの2つの伝導帯31、32に分離する。図3(a)は、この伝導帯31、32の分離の様子を示している。電子エネルギーレベルが低い伝導帯31に存在する電子はアップスピン、電子エネルギーレベルが大きい伝導帯32に存在する電子はダウンドスピニンと定義される。即ち、強磁性体の磁化Mの向きと電子の角運動量の向きが平行になる電子はアップスピン、強磁性体の磁化Mの向きと電子の角運動量の向きが反平行になる電子はダウンドスピニンと定義される。

【0021】又、第2強磁性薄膜14が図1に示す基準軸xの正の向き、従って、第1強磁性薄膜12の磁化の向きに平行に磁化されたとする。エネルギーレベルEに対する電子の状態密度D(E)の分布曲線は、第1強磁性薄膜12のそれと全く等しくなる。よって、図3(a)に示すように、アップスピンに対して伝導帯41、ダウンドスピニンに対して伝導帯42の2つの伝導帯に分離したエネルギー状態図を描くことができる。

【0022】エネルギーレベルEでのスピン偏極率P(E)は、アップスピンの電子密度をN+(E)、ダウンドスピニンの電子密度をN-(E)をとすると以下のように定義することができる。

【数1】

$$P(E) = (N_+(E) - N_-(E)) / (N_+(E) + N_-(E)) \quad \dots (1)$$

【0023】ここで用いられている強磁性体は式(1)で定義されるスピン偏極率P(E)がフェルミレベルfeで0.2~0.5程度の物質である。よって、アップスピン電子がダウンドスピニン電子よりも多く存在しており、それはフェルミレベルfe付近においても同じである。よって、伝導帯31、32と、41、42とフェルミレベルfeとの関係は図3(a)に示すような関係となる。

【0024】今、電極15側が正、電極11側が負となるように電圧を印加したとする。電子が、第1強磁性薄膜12から第1強磁性薄膜14の側へ絶縁層13を介してトンネルする時、スピン角運動量が保存され、従って、スピンの向きも保存されるために、第1強磁性薄膜12中のアップスピンがとり得るエネルギーレベルが第2強磁性薄膜14にも存在しなければならない。第1強磁性薄膜12と第2強磁性薄膜14の磁化Mの向きが平行の場合には、図3(a)に示すように、アップスピンの伝導帯31、41及びダウンドスピニンの伝導帯32、42の中にフェルミレベルfeが存在するので、第1強磁性薄膜12中のフェルミレベルfeにあるアップスピン電子は、第2強磁性薄膜14中のアップスピン電子の伝導帯41において1/2の割合で満たされた同一エネルギーレベルに遷移することができる。同様に、ダウンドスピニン電子も、第2強磁性薄膜14中のダウンドスピニン電子の伝導帯42において、1/2の割合で満たされた同一エネルギー

【0025】b) 磁化の向きが反平行の場合

第1強磁性薄膜12と第2強磁性薄膜14とが反対向きに磁化された場合について説明する。第1強磁性薄膜12が図1に示す基準軸xの正の向きに磁化されたとする。これは、磁化の向きが平行の場合のときに示した第1強磁性薄膜12の磁化の状態と同じであるので、この時の第1強磁性薄膜12の伝導帯31、32のエネルギー状態図は、図3(a)に示すものと全く同じに描くことができる。

【0026】一方、第2強磁性薄膜14は図1に示す基準軸xの負の向き、従って第1強磁性薄膜12と反平行に磁化されたとする。この時も、交換相互作用によりエネルギーレベルの縮退が解けて、第2強磁性薄膜14の磁化の向きと平行なスピンを持つ電子の伝導帯41のエネルギー状態図は、図3(b)に示すようになる。

【0027】しかし、第1強磁性薄膜12と第2強磁性

\* 準軸xの正の向きに磁化されたとする。強磁性体の伝導帯は交換相互作用によりアップスピンとダウンドスピニンの2つの伝導帯31、32に分離する。図3(a)は、この伝導帯31、32の分離の様子を示している。電子エネルギーレベルが低い伝導帯31に存在する電子はアップスピン、電子エネルギーレベルが大きい伝導帯32に存在する電子はダウンドスピニンと定義される。即ち、強磁性体の磁化Mの向きと電子の角運動量の向きが平行になる電子はアップスピン、強磁性体の磁化Mの向きと電子の角運動量の向きが反平行になる電子はダウンドスピニンと定義される。

【0021】又、第2強磁性薄膜14が図1に示す基準軸xの正の向き、従って、第1強磁性薄膜12の磁化の向きに平行に磁化されたとする。エネルギーレベルEに対する電子の状態密度D(E)の分布曲線は、第1強磁性薄膜12のそれと全く等しくなる。よって、図3(a)に示すように、アップスピンに対して伝導帯41、ダウンドスピニンに対して伝導帯42の2つの伝導帯に分離したエネルギー状態図を描くことができる。

【0022】エネルギーレベルEでのスピン偏極率P(E)は、アップスピンの電子密度をN+(E)、ダウンドスピニンの電子密度をN-(E)をとすると以下のように定義することができる。

【数1】

※ルギーレベルに遷移することができる。第1強磁性薄膜12と第2強磁性薄膜14とにおけるフェルミレベルfeでの状態の占有確率は共に1/2であり、状態密度は各電子数に比例すると考えられるから、アップスピン電子とダウンドスピニン電子は、それぞれ、各電子数の2倍に比例した数の電子がトンネル電流に寄与する。従って、磁化の向きが平行の時の抵抗値を小さくすることができる。

【0025】b) 磁化の向きが反平行の場合

第1強磁性薄膜12と第2強磁性薄膜14とが反対向きに磁化された場合について説明する。第1強磁性薄膜12が図1に示す基準軸xの正の向きに磁化されたとする。これは、磁化の向きが平行の場合のときに示した第1強磁性薄膜12の磁化の状態と同じであるので、この時の第1強磁性薄膜12の伝導帯31、32のエネルギー状態図は、図3(a)に示すものと全く同じに描くことができる。

【0026】一方、第2強磁性薄膜14は図1に示す基準軸xの負の向き、従って第1強磁性薄膜12と反平行に磁化されたとする。この時も、交換相互作用によりエネルギーレベルの縮退が解けて、第2強磁性薄膜14の磁化の向きと平行なスピンを持つ電子の伝導帯41のエネルギー状態図は、図3(b)に示すようになる。

【0027】しかし、第1強磁性薄膜12と第2強磁性

薄膜14において、電子のスピンの向きの基準を異なる方向に取ると不便があるので、第1強磁性薄膜12の内部磁場H、即ち、基準軸xの正方向を統一した基準方向と定める。そうすると、第2強磁性薄膜14においては、その磁化Mの向きと反平行のスピンがアップスピン、その磁化Mの向きと平行のスピンがダウンド спинとなる。このようにして、図3(b)に示すように、エネルギー軸に対して右側が共通したアップスピン、左側が共通したダウンドスピニのエネルギー状態図となる。

【0028】電子が第1強磁性薄膜12から第2強磁性薄膜14へ絶縁層13を介してトンネルする時は、スピンの向きが保存されるために、第1強磁性薄膜12中のアップスピンの電子がトンネルする場合には第1強磁性薄膜12中のアップスピンが取り得るエネルギーレベルが第2強磁性薄膜14にも存在しなければならない。フェルミレベルfeは、第1強磁性薄膜12と第2強磁性薄膜14におけるアップスピンの伝導帯31、41とダウンドスピニの伝導帯32、42の中にフェルミレベルfeが存在する。又、伝導帯31、41において、フェルミレベルfeにおける状態密度の比は、それぞれの電子数の比程度と考えられるから、図3(a)の場合に比べ \*

$$MR = (R_{ap} - R_p) / R_p = 2P_1 P_2 / (1 - P_1 P_2) \dots (2)$$

ただし、 $R_{ap}$ は反平行時の抵抗、 $R_p$ は平行時の抵抗、 $P_1$ は第1強磁性体のスピン偏極率、 $P_2$ は第2強磁性体のスピン偏極率である。尚、上記の実施例では、第2強磁性薄膜14を第1強磁性薄膜12に対して正電位としたが、逆方向に電圧を印加しても、逆方向にトンネル電流が流れるだけで、上記の議論はそのまま成立する。

【0031】上記の磁化の平行時のトンネル電流の原理で説明したことは、注入電極23aからDMS層22への電子の注入においても同様に成立する。即ち、図3(a)において、注入電極23aのアップスピン電子の伝導帯が31、ダウンドスピニ電子の伝導帯が32、DMS層22のアップスピン電子の伝導帯が41、ダウンドスピニ電子の伝導帯が42となる。よって、注入電極23aからはアップスピン電子の方がダウンドスピニ電子よりも多く注入されることが理解される。

【0032】上記第1実施例において、保持力の小さな強磁性体(例えば、第1強磁性体)として、Fe、Ni、Co元素のうち2種以上を含みCo元素が40at%以下のもの、保持力の大きな強磁性体(例えば、第2強磁性体)として、Co、Co-Sm、Co-Cr-Fe、Co-Pt、Co-Pt-Ni、Co-Pt-V等のCo元素を20at%以上含む材料を用いることができる。又、上記第1実施例において、強磁性体はスピン偏極率が0.2~0.5程度の鉄合金を用いているが、スピン偏極率が1となる強磁性半金属を用いてよい。強磁性半金属としては、NiMnSb、CoMnSb、FeMnSb、CrO<sub>2</sub>、La<sub>1-x</sub>Ca<sub>x</sub>MnO<sub>3</sub>等を採用することができる。その他、一般的に、C1b型の結晶構造を有するホイスラー合金、Mnを含む合金を採用することができる。これらの※50

\*て、伝導帯31のアップスピンのトンネルする電子数は、伝導帯31のアップスピンの電子数と伝導帯41のアップスピンの電子数の積に比例し、伝導帯32のダウンドスピニのトンネルする電子数は、伝導帯32のダウンドスピニの電子数と伝導帯42のダウンドスピニの電子数の積に比例すると考えられる。よって、この場合にトンネル電流は図3(a)の場合に比べて小さくなり、抵抗値が大きくなる。

【0029】同一フェルミレベル間を遷移する電子数10は、そのレベルの電子数と遷移先のレベルの空状態数との積に比例し、空状態数はそのフェルミレベルの電子数にも比例する。よって、トンネル電流に寄与するアップスピンの電子数は、伝導帯31と伝導帯41に存在するアップスピンの電子数の積、ダウンドスピニの電子数は、伝導帯32と伝導帯42に存在するダウンドスピニの電子数の積に比例する。よって、この強磁性スピントンネル効果素子の抵抗変化率MRは、偏極率を用いて次のように表すことができる。

【0030】  
20 【数2】

$$MR = 2P_1 P_2 / (1 - P_1 P_2) \dots (2)$$

※材料を強磁性体に用いることにより、抵抗変化率を理想的には無限大まで向上させることができる。

【0033】第1実施例の第1強磁性薄膜12と第2強磁性薄膜14を共に磁性半金属とした場合の強磁性スピントンネル効果素子100の動作原理について説明する。

a) 磁化の向きが平行の場合

30 強磁性半金属は式(1)で定義されるスピン偏極率がフェルミレベルfeで1の金属であり、アップスピンの電子数N+がダウンドスピニの電子数N-に比べて十分大きい場合に、スピン偏極率は十分に1に近くなる。よって、強磁性半金属では、アップスピンが多数電子となり、フェルミレベルfeの付近にはダウンドスピニの状態が存在しないので、第1強磁性薄膜12の2つの伝導帯31、32と第2強磁性薄膜14の2つの伝導帯41、42とフェルミレベルfeとの関係は、図4(a)に示すようになる。

40 【0034】図4(a)に示すように、アップスピンの伝導帯31、41の中にフェルミレベルfeが存在するので、第1強磁性薄膜12中のフェルミレベルfeにあるアップスピン電子は、第2強磁性薄膜14中の1/2の割合で満たされた同一エネルギーレベルに遷移することができる。第1強磁性薄膜12と第2強磁性薄膜14におけるフェルミレベルfeでの状態の占有確率は共に1/2であり、アップスピン電子は、この電子数の2乗に比例した数だけトンネルでき、低い抵抗率で絶縁層13をトンネル伝導することができる。これにより、磁化的向きが平行の時の抵抗値を極めて小さくすることができ

る。

【0035】b) 磁化の向きが反平行の場合

図4(a)の伝導帯モデルを、磁化の向きを反平行とした図3(b)の関係に適用することで、図4(b)のモデルを得ることができる。図4(b)に示すように、第1強磁性薄膜12ではアップスピンド電子の伝導帯31にフェルミレベルfeが存在しているが、第2強磁性薄膜14ではアップスピンド電子の伝導帯41にはフェルミレベルfeが存在せずアップスピンド電子はフェルミレベルfeより高いエネルギーにしか存在しない。よって、アップスピンド電子は第1強磁性薄膜12から第2強磁性薄膜14に向けて絶縁層13をトンネル伝導することはできない。これにより、磁化Mの向きが反平行のときには抵抗値を大きくすることができる。

【0036】上記のように、両方の強磁性体を強磁性半金属とすることにより、磁化Mの向きが平行のときには抵抗が小さく、磁化Mの向きが反平行のときには抵抗が非常に大きくなるので、抵抗変率MRが大きくなることが分かる。また、抵抗変率MRは式(2)で表されるので、この式に従って考えると、両方の強磁性体のスピンド偏極率を1に近づけると抵抗変率が大きくなることが分かるので、強磁性体としてスピンド偏極率が1である物質である強磁性半金属を用いることによって抵抗変率を無限大とすることができる。また、強磁性半金属を2つの強磁性体の何れか一方だけに使用しても、式(2)より明らかなように、両方の強磁性体を強磁性半金属で形成した場合よりも抵抗変率は小さくなるが、両方の強磁性体をスピンド偏極率が0.2~0.5程度の強磁性体で形成した場合よりは抵抗変率を大きくすることができる。

【0037】又、注入電極23a、23bを強磁性半金属とすることで、アップスピンド電子のみをDMS層22に注入することができ、その磁化効率を向上させることができる。即ち、上述した図4(a)において、注入電極23aでは、アップスピンド電子しかフェルミレベルfeに存在しないので、アップスピンド電子しかDMS層22に注入されない。この結果、注入電子数に対するDMS層22の磁化割合を増大させることができる。

【0038】次に、第2実施例について説明する。本実施例の素子200は、図5に示すように、第1実施例と同様に、DMS層22まで形成するが、本実施例では注入電極24a、24bが存在しない。DMS層22の上面と対向して、Fe-2.0at%C合金により形成された走査顕微鏡と同様な極細い針25が真空状態において、間隙dだけ隔てて配設されている。この針25にはコイル251が巻かれており、針25をx軸方向に磁化させることができる。そして、その間隙dにおいて、針25に対して電子を電界放出させるためのグリッド252が配設されている。

【0039】上記の素子200において、DMS層22

を針25に対して電源E1により正電位とし、グリッド252を針25に対して電源E2(E2>E1)により正電位とする。これにより、針25から電子が電界放出され、DMS層22に注入する。多数電子のスピンドの向きはコイル251へ流れる電流の向きを制御することで変化させることができる。この時、針25からDMS層22への電子の注入に関しては、上述した図3(a)の伝導帯モデルが成立する。又、針25を磁性半金属で構成することで、DMS層22の磁化効率を高めることができ、針25からDMS層22への電子の注入に関しては、上述した図4(a)の伝導帯モデルが成立する。

【0040】次に、第3実施例について説明する。本実施例の素子300は、図6に示すように、第1実施例と同様に、DMS層22まで形成するが、本実施例では注入電極24a、24bが存在しない。DMS層22に円偏光を照射することで、DMS層22を円偏光の回転方向に従ってx軸の正、負の向きに磁化させることができる。その他の構成、作用は第1実施例と同様である。

【0041】この素子300では、第1強磁性薄膜11の磁化の向きを固定しておくことで、トンネル電流Iの大きさをDMS層22に入射する円偏光の回転方向に応じて変化させることができる。これにより光一電流変調素子が得られる。

【0042】上記の第1~第3実施例の素子を次のように応用した素子を形成することができる。即ち、第1~第3実施例の構造の素子を1区画として、この素子を平面上に多数配列し、各区画の第1強磁性薄膜22を磁化して、その磁化の向きにより「0」、又は、「1」のデータを記憶させる。そして、各区画毎にDMS層22の磁化の向きを反転させ、トンネル電流が大きくなる方の磁化の向きにより第1強磁性薄膜22の磁化の向き、即ち、記憶情報を読み取ることができる。

【0043】又、DMS層22の磁化の向きを注入電流により固定し、第1強磁性薄膜11の磁化の向きを外部磁場により変化させることで、外部磁場の向きを検出することができる。又、DMS層22の磁化の大きさは、注入電流の大きさにより制御可能であるので、第2強磁性薄膜14のバイアス磁場を変化させることができる。よって、トンネル電流が急激に増大する時のDMS層22への注入電流の大きさにより外部磁場Hの大きさを検出することができる。

【0044】上記全実施例において、磁化の向きは各層の面に平行でも垂直でも何方でもよい。

【図面の簡単な説明】

【図1】本発明の第1実施例に係る強磁性トンネル効果素子の断面図

【図2】上記素子のDMS層上の構成を示した平面図。

【図3】強磁性スピントンネル効果素子における強磁性トンネル効果を説明するためのエネルギー状態図

【図4】強磁性スピントンネル効果素子に強磁性半金属

11

を用いた場合の強磁性トンネル効果を説明するためのエネルギー状態図

【図5】本発明の第2実施例に係る強磁性トンネル効果素子の断面図

### 【図6】本発明の第3実施例に係る強磁性トンネル効果素子の断面図

## 【符号の説明】

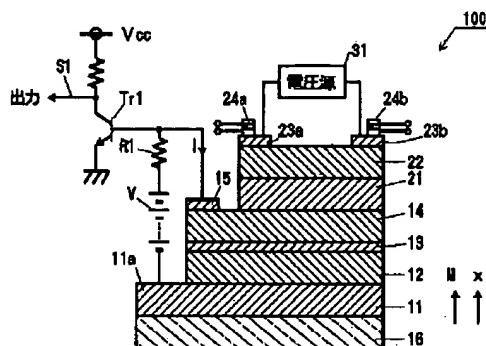
### 11、15…電極

1 2…第1強磁性薄膜（第1強磁性体）

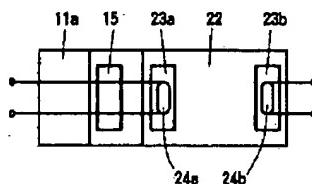
12

1 3…絶縁層  
 1 4…第2強磁性薄膜（第2強磁性体）  
 2 1…強磁性絶縁層（強磁性絶縁体）  
 2 2…D M S層（希薄磁性半導体）  
 2 3 a、2 3 b…注入電極  
 2 4 a、2 4 b…コイル  
 2 5…針  
 2 5 1…コイル  
 2 5 2…グリッド

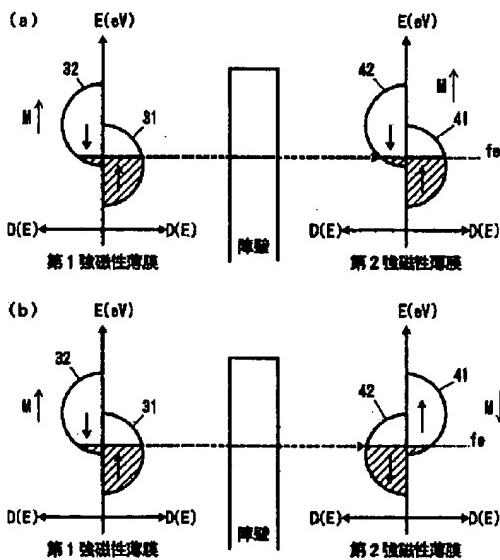
【図1】



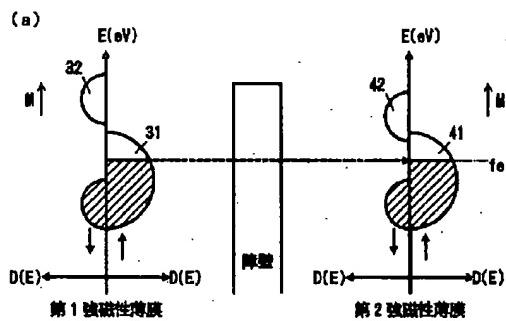
【図2】



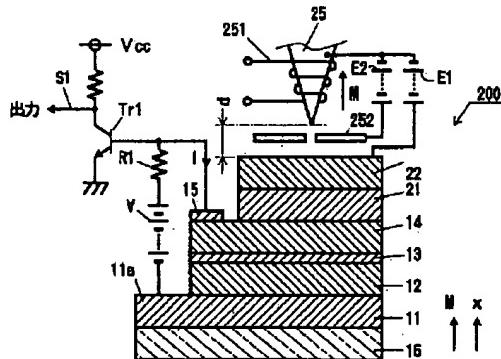
【图3】



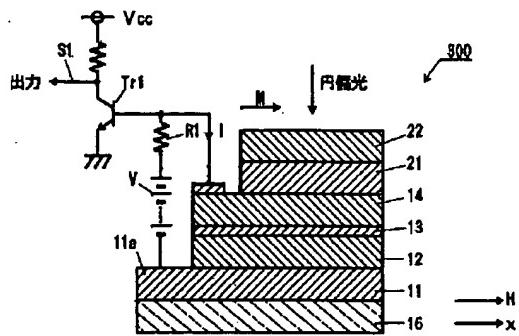
[図4]



【図5】



【図6】



フロントページの続き

(72)発明者 多賀 康訓

愛知県愛知郡長久手町大字長湫字横道41番  
地の1 株式会社豊田中央研究所内

(72)発明者 只野 博

愛知県愛知郡長久手町大字長湫字横道41番  
地の1 株式会社豊田中央研究所内

(72)発明者 加地 徹

愛知県愛知郡長久手町大字長湫字横道41番  
地の1 株式会社豊田中央研究所内

(72)発明者 田中 雄一

愛知県愛知郡長久手町大字長湫字横道41番  
地の1 株式会社豊田中央研究所内

(72)発明者 富田 一義

愛知県愛知郡長久手町大字長湫字横道41番  
地の1 株式会社豊田中央研究所内